

Absorción de energía de estructuras tipo sándwich con base cuadrada sujetas a cargas de compresión

Energy absorption of sandwich structures with square base subjected to compression loads

ESTRADA, Quirino^{1†*}, BOLAÑOS, Miguel A², SZWEDOWICZ, Dariusz³ y WIEBE-QUINTANA, Lara¹

¹ Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ingeniería y Tecnología

² Instituto Tecnológico de Pachuca/TecNM. Departamento Metal/Mecánica

³ Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico/TecNM. Departamento de Ingeniería Mecánica

ID 1^{er} Autor: *Quirino, Estrada* / ORC ID: 0000-0003-0623-3780

ID 1^{er} Coautor: *Miguel A, Bolaños*

ID 2^{do} Coautor: *Dariusz, Szwedowicz*

ID 3^{er} Coautor: *Lara, Wiebe-Quintana*

Recibido Septiembre 01, 2018; Aceptado: Diciembre 05, 2018

Resumen

En el presente artículo se realiza un análisis numérico de la absorción de energía de perfiles de pared delgada tipo sándwich. Para tal objetivo diversas configuraciones de arreglos cuadrangulares fueron evaluadas empleando el software de elemento finito Abaqus®. Las estructuras evaluadas presentan diversas secciones transversales basadas en formas cuadrangulares reforzadas con platos de partición. Durante la evaluación numérica los arreglos tipo sándwich fueron sujetos a carga de compresión y evaluadas a partir de parámetros tales como absorción de energía (E_a) y eficiencia de la fuerza de aplastamiento (CFE). Con el objeto de tener resultados confiables un primer modelo discreto fue validado experimentalmente a partir de un ensayo de compresión. De acuerdo con los resultados obtenidos y considerando una misma masa para todos los arreglos, la implementación de platos de partición permite un incremento de E_a en 16.50% al compararse con un perfil cuadrado sin refuerzos. Respecto a los arreglos con refuerzos, el mejor comportamiento lo obtuvo el arreglo con sección transversal reforzada con platos de partición en forma de cruz con un incremento de CFE en un 6.75%.

Estructuras sándwich, FEM, Crashworthiness

Abstract

In the present article a numerical analysis on energy absorption of sandwich thin-walled structures is performed. For this purpose, several square arrangements using Abaqus® finite element software were evaluated. The evaluated structures have different cross-sections, which are based on square shapes reinforced by partition plates. During the numerical evaluation, the sandwich arrangements were subjected to compression loads and evaluated by parameters such as energy absorption (E_a) and crush force efficiency (CFE). In order to get reliable results, a first numerical model was experimentally validated by a compression test. According to results and considering the same mass for all arrangements, the implementation of partition plates increases up to 16.50% the E_a parameter compared to profile without reinforcements. Regarding profiles with plates, the better performance was obtained by the structure with reinforcement in cross way. An increase of 6.75% regard to single structure in CFE parameter was computed.

Sandwich structures, FEM, Crashworthiness

Citación: ESTRADA, Quirino, BOLAÑOS, Miguel, SZWEDOWICZ, Dariusz y WIEBE-QUINTANA, Lara. Absorción de energía de estructuras tipo sandwich con base cuadrada sujetas a cargas de compresión. Revista de Tecnología e Innovación. 2018. 5-17: 1-7.

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: quirino.estrada@uacj.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Actualmente en México son reportados más de 360 mil accidentes automovilísticos los cuales han provocado la muerte de 4,559 mexicanos y un número de lesionados que asciende a 97,614 sólo en el año 2016 [1]. Un porcentaje importante de estos sucede principalmente por impactos laterales. Al ocurrir los choques laterales la fuerza de impacto es transmitida a los pasajeros provocando lesiones en la región craneal, cervical, abdominal los cuales culminan en el deceso de los pasajeros por el efecto de latigazo [2]. Para contrarrestar tal situación las estructuras automotrices son diseñadas para aumentar su resistencia al impacto y salvaguardar la integridad de los ocupantes (crashworthiness).

Dentro de los sistemas de absorción de energía el empleo de la deformación plástica de perfiles estructurales está en incremento. Diversas configuraciones de perfiles de pared delgada se han estudiado entre los que destacan perfiles simples, bi-tubulares, concéntricos y estructuras tipo sándwich. Una estructura tipo sándwich se define como una estructura compuesta por un núcleo y dos hojas a los extremos (ver Figura 1).

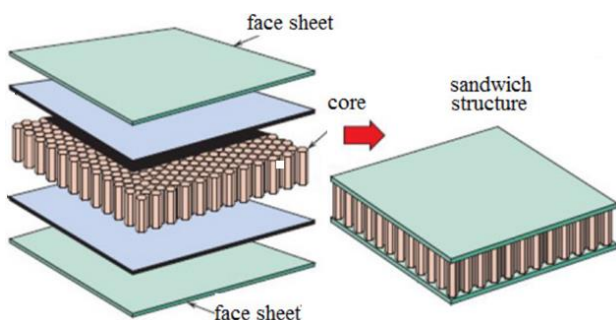


Figura 1 Componentes de una estructura tipo sándwich [3]

Las capacidades de absorción de energía de las estructuras tipo sándwich dependen del material de fabricación [4], geometría del núcleo [5] y espesor [6]. En este sentido diversos trabajos se han realizado para determinar el comportamiento cuasi-estático de los paneles tipos sándwich bajo cargas de compresión tal y como lo presentan McFarland [7] y Wierzbicki [8]. Otros trabajos se han centrado en el estudio de estas estructuras con aplicación en la industria automotriz. Jacob et al. [9] desarrollaron un estudio numérico empleando paneles hexagonales de acero en un parachoque.

De acuerdo con sus resultados se logró una mejora en la absorción de energía en un 11.26% en comparación con un parachoque convencional. Por su parte Paz et al. [10] realizaron estudios numéricos empleando perfiles de pared delgada de aluminio con paneles tipo sándwich de fibra de vidrio reforzada con polímero (GFRP). Los resultados mostraron una mejora en la absorción de energía específica (SEA) del 22% respecto a perfiles simples de aluminio. Davalos et al. [11] estudiaron la efectividad de estructuras honeycomb fabricadas de plástico reforzado con fibra (FRP) aplicadas en sistemas de contención de carreteras. La estructura analizada presenta un núcleo con geometría sinusoidal en el plano y extendida en forma vertical hacia las láminas-cubiertas. Los resultados obtenidos muestran la factibilidad de la configuración sinusoidal para aplicaciones de absorción de energía. Por su parte Caserta et al. [12] realizaron modificaciones en los cascos de seguridad comerciales incorporando paneles hexagonales de aluminio. Como conclusión mostraron que los prototipos proporcionaban una mejor protección a los motociclistas respecto a cascos convencionales.

Finalmente, tal y como se ha descrito el empleo de estructuras tipo sándwich para el control de cargas dinámicas en choques laterales es un tópico actual y en desarrollo. Bajo este entendido el presente artículo analiza el efecto de la sección transversal de estructuras tipo sándwich en las capacidades de absorción de energía.

Para tal objetivo diversas simulaciones computacionales empleando el software de elemento finito Abaqus fueron realizadas. Las estructuras evaluadas presentan diversas secciones transversales basadas en formas cuadrangulares reforzadas con costillas.

Validación

Dado que el análisis es numérico se realizó un primer modelo discreto para validar la efectividad del software Abaqus® para el análisis de deformación plástica. Partiendo del hecho que una estructura tipo sándwich se obtiene a partir de la unión de varios perfiles sencillos, el modelo discreto a validar es un perfil cuadrado de aluminio sujeto a compresión.

Las dimensiones del perfil son 38.1 mm x 38.1 mm x 130 mm con un espesor de 1.5 mm. La prueba de compresión se realizó en una máquina universal Time Group 300 kN a una velocidad de 6 mm/min. La discretización de la estructura se realizó con un tamaño de malla de 5 mm. Tal valor fue validado directamente a través de los resultados experimentales. Respecto a los platos de compresión estos se modelaron como cuerpos rígidos con elementos R3D3. Detalles del modelo discreto y condiciones de la frontera se presentan en la Figura 2.

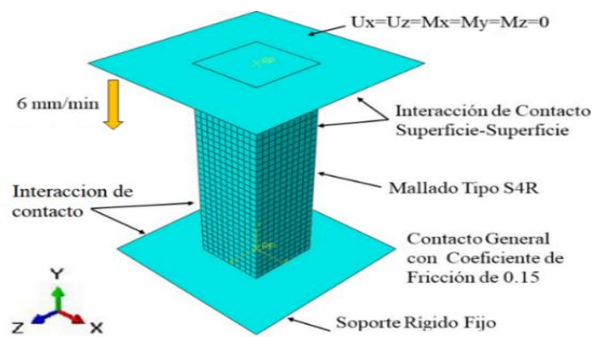


Figura 2 Detalles del modelo discreto

Respecto a las propiedades del material se utilizó un aluminio 6063-T6 con un módulo de Young (E) de 68.9 GPa, coeficiente de Poisson de 0.33, límite de fluencia de 145 MPa y una densidad de 2700 kg/m³.

La comparación de los resultados experimentales y numéricos se presenta en las Figuras 3 y 4. La Figura 3 muestra la curva fuerza vs desplazamiento durante el proceso de compresión. El modelo discreto representa correctamente la carga máxima (P_{max}) y la fuerza promedio (P_m). En este sentido se obtuvo un valor de P_{max} cercano a 35 kN y un valor de P_m igual a 15 kN aproximadamente. Para ambos casos diferencias menores al 5% respecto a los datos experimentales fueron calculados.

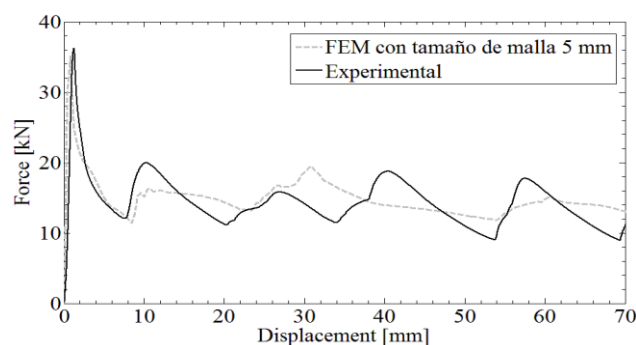


Figura 3 Comparación de la curva fuerza vs desplazamiento

El modo de deformación se presenta en la Figura 4, donde se observa un patrón de deformación simétrico. Tal modo es caracterizado por la formación de pliegues al exterior del perfil, así como una línea de bisagra acompañada por la formación de superficies cilíndricas, cónicas y toroidales. Detalles de este modo de deformación son descritos por Estrada et al. [14]. Finalmente, a partir de las mínimas diferencias inferiores al 5% para P_{max} y E_a así como la congruencia en el modo de deformación entre análisis, el modelo discreto es validado. Por tanto, es posible continuar con el estudio de estructuras tipo sándwich sujetas a compresión, principal objetivo del presente artículo.

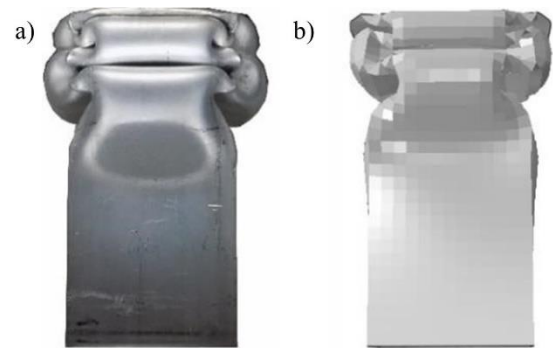


Figura 4 Estado de deformación final de la estructura, donde, a) experimental y b) FEM

Simulaciones computacionales

El objetivo del presente artículo es evaluar el efecto de la sección transversal en la absorción de energía de arreglos tipo sándwich. Para tal objetivo diversos arreglos con base cuadrada fueron sujetas a cargas de compresión y evaluadas de forma cuasi-estática. Con el objeto de tener un patrón de referencia todos los arreglos tipo sándwich presentan la misma masa igual a 0.350 kg. Por tanto, diversos espesores fueron utilizados.

En todos los casos el material de fabricación fue aluminio 6063-T6. Con el objeto de observar únicamente el efecto de la sección transversal, la compresión se realizó a 5 mm. Una compresión mayor recogería la respuesta de la compactación de los arreglos como si fueran sólidos. Todas las estructuras evaluadas presentan la misma base geométrica (cuadrada) y un alto 30 mm. Detalles geométricos de los especímenes evaluados son presentados en la Figura 5 y Tabla 1.

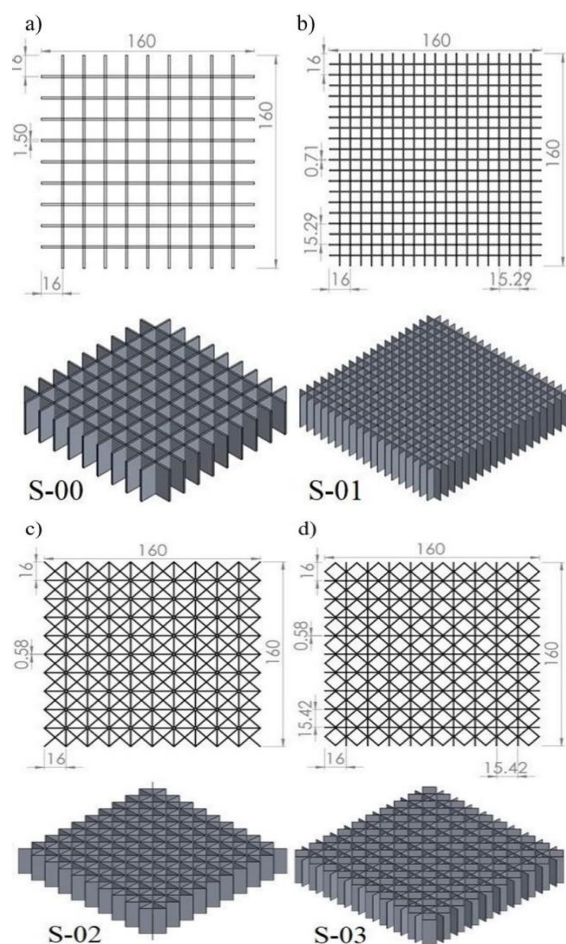


Figura 5 Arreglos tipo sándwich a evaluar, a) rejilla simple, b) rejilla con refuerzo en cruz, c) rejilla con refuerzo diagonal, d) rejilla con refuerzo en diamante, unidades en mm.

Código	Espesor (mm)	Refuerzo
S-00	1.50	Rejilla simple
S-01	0.71	Rejilla con refuerzo en cruz
S-02	0.58	Rejilla con refuerzo diagonal
S-03	0.58	Rejilla con refuerzo diamante

Tabla 1 Detalles de las estructuras tipo sándwich

La evaluación de los especímenes y su desempeño en la absorción de energía se realizó a partir de parámetros dimensionales y adimensionales.

Tales parámetros son la energía absorbida (E_a), la fuerza promedio (P_m), la carga pico (P_{max}), la eficiencia de la fuerza de aplastamiento (CFE) y la absorción de energía específica (SEA) los cuales se representan en la Figura 6.

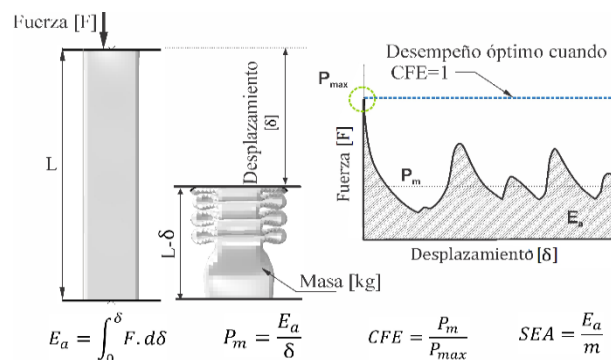


Figura 6 Indicadores de absorción de energía [14]

Resultados y discusión

El desempeño en las características de absorción de energía se obtuvo a partir las curvas fuerza vs deformación. Tales curvas presentan un aumento gradual de la carga de aplastamiento (F) hasta alcanzar un primer valor máximo (P_{max}) cercano a 700 kN. Físicamente representa la resistencia inicial del sistema a ser deformado plásticamente. Posteriormente una caída de F es observada lo cual indica la formación de la línea de bisagra, punto donde iniciará la deformación plástica. Al observar la Figura 7 dos comportamientos se presentan, el primero descrito por los especímenes S-00 y S-01 y un segundo presentado por las estructuras S-02 y S-03.

En el primero, una vez alcanzado el valor P_{max} las estructuras tienden a mantener la fuerza de aplastamiento. Caso contrario se observa en los perfiles S-02 y S-03 los cuales presentan una disminución considerable después de alcanzar P_{max} . Adicionalmente al acercarse un desplazamiento de 2.7 mm las estructuras presenta la pérdida de la capacidad de carga total. Posteriormente un aumento de la fuerza de aplastamiento es registrado. Tal acción se atribuye al aumento de la rigidez del sistema causado por la interacción entre las paredes de la estructura tipo sándwich.

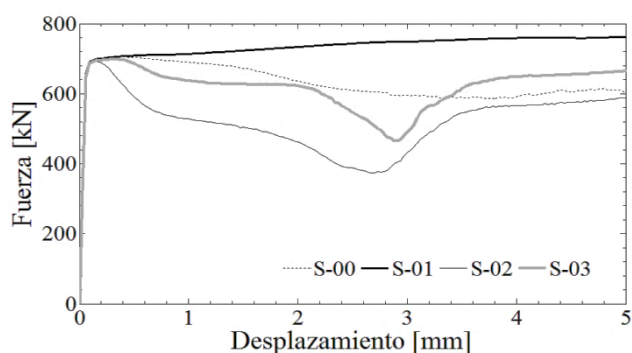


Figura 7 Curva fuerza vs deformación de estructuras sándwich evaluadas numéricamente

La cantidad de energía absorbida por los arreglos tipo sándwich están en función de cantidad de deformación plástica sufrida. En este sentido una mayor deformación plástica se ve traducida en una mayor absorción de energía (E_a).

Tal acción repercute en una mayor área bajo la curva en las gráficas fuerza vs desplazamiento. El cálculo de E_a a lo largo de 5 mm de desplazamiento se presenta en la Figura 8.

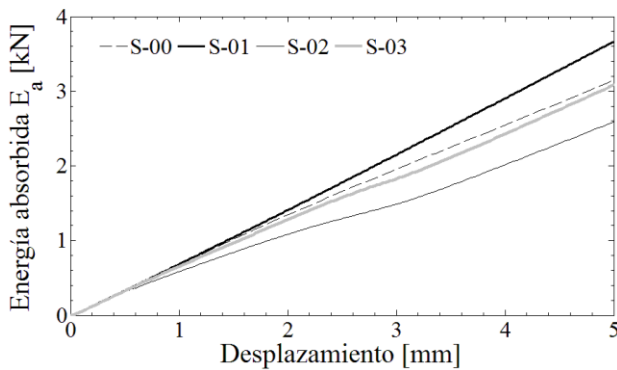


Figura 8 Energía absorbida por las estructuras sándwich evaluadas numéricamente

De acuerdo con los resultados obtenidos la estructura con refuerzo en forma en cruz (S-02) obtuvo el valor más bajo de absorción de energía (E_a).

Los perfiles S-00 y S-03 presentan comportamientos muy similares. Mientras que la estructura con refuerzo en forma de cruz (S-01) presenta la mayor cantidad de E_a igual a 3.67 kJ.

La explicación a este comportamiento está estrictamente relacionado a la rigidez que presenta la sección transversal del arreglo. En este sentido colocar refuerzos en forma de cruz permitió obtener mayor estabilidad del sistema y una mejor distribución de esfuerzos.

Al momento del proceso de deformación plástica tal sección transversal mostró mayor resistencia a la formación de pliegues plásticos por tanto la fuerza requerida para la formación de la línea de bisagra, superficies cilíndricas y cónicas fue mayor.

Detalles de los modos de deformación para todas las estructuras evaluadas son presentadas en la Figura 9 y 10.

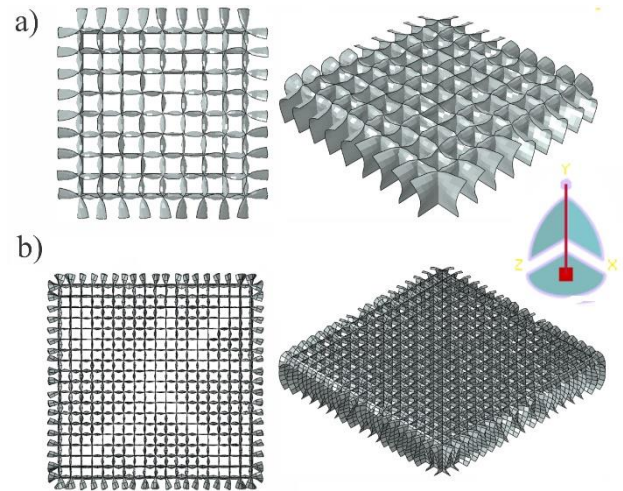


Figura 9 Estado final de deformación a 5 mm, donde a) arreglo S-00, b) arreglo S-01

Respecto a las secciones transversales restantes se observó que los perfiles reforzados con costillas en forma de cruz (S-02) y diamante (S-03) demostraron su poca efectividad para la absorción de energía. Esto sugiere que la rigidez de tales secciones transversales no presenta resistencia para la formación de pliegues plásticos.

En este sentido a pesar de que sufren deformación plástica, la absorción de energía es menor respecto a los perfiles S-00 y S-01.

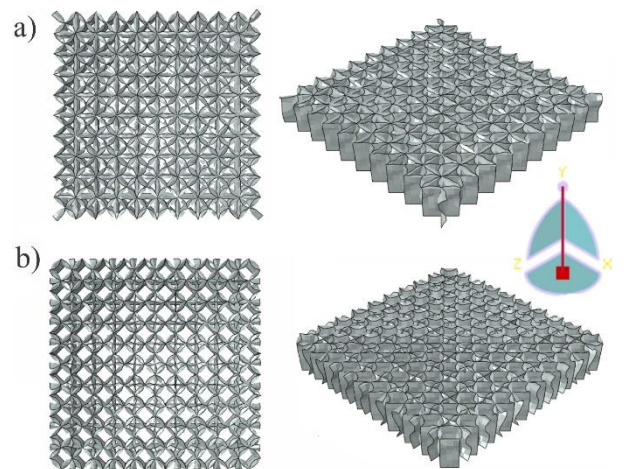


Figura 10 Estado final de deformación a 5 mm de desplazamiento, donde a) arreglo S-02, b) arreglo S-03

En la Tabla 2 se presenta un resumen de los resultados numéricos calculados a partir de la Figura 6. Considerando el valor pico (P_{max}) los valores obtenidos fueron muy próximos con un valor aproximado de 700 kN.

Sin embargo, el valor más bajo de P_{max} se obtuvo al reforzar la sección transversal con refuerzos en forma de cruz (693.5 kJ). Una vez alcanzado el valor P_{max} todas las estructuras mostraron una disminución de la fuerza de aplastamiento, tal efecto se ve reflejado en el valor de la fuerza promedio (P_m).

Teóricamente un mejor desempeño de E_a se obtiene cuando el valor de P_m no varía respecto al valor P_{max} . Tal comportamiento se corrobora al calcular la energía absorbida (E_a). El máximo valor de E_a lo obtuvo el perfil S-01 (refuerzo en forma de cruz) que corresponde a un aumento del 16.50% respecto a un perfil sin refuerzo (S-00).

Dado que todos los arreglos tienen la misma masa, el mejor comportamiento de la absorción de energía específica (SEA) fue la estructura S-01 con un valor de 10.48 J/gr.

Cod	P_{max}	P_m	E_a	SEA	CFE
S-00	705.6	630	3.15	9.00	0.89
S-01	761.9	734	3.67	10.48	0.95
S-02	693.5	522	2.61	7.45	0.75
S-03	698.2	616	3.08	8.80	0.88

Tabla 2 Resumen de los resultados numéricos obtenidos, donde P_{max} y P_m en kN, E_a en kJ y SEA en J/g

Una mayor cantidad de energía absorbida no significa necesariamente un mejor desempeño de la estructura para aplicaciones de seguridad de pasajeros. Para poder evaluar esta condición es necesario calcular el valor de la eficiencia de la fuerza de aplastamiento (CFE). Tal parámetro es óptimo cuando se aproxima a un valor de 1.

De acuerdo con la Tabla 2 el perfil S-01 obtuvo el valor más alto de CFE igual 0.95. Tal valor comparado con el perfil base sin refuerzos (S-00) representa una mejora del 6.75%. Este valor sugiere que la estructura con refuerzos en forma de cruz (S-01) presentó un valor bajo de P_{max} con una gran cantidad de energía absorbida.

Finalmente, de acuerdo a los resultados obtenidos y para el caso específico de las condiciones evaluadas en el presente artículo, se determinó que el desempeño en absorción de energía de los arreglos tipo sándwich está directamente influenciado en primer lugar por la forma de la sección transversal, seguido del número de costillas y finalmente del espesor.

En este sentido, reforzar una sección transversal cuadrada con costillas en forma de cruz (S-01), permite una mejor estabilidad de la estructura y una mayor deformación de la misma. Por tanto, tales arreglos deberían ser considerados como una solución efectiva y de bajo costo para el diseño de sistemas de absorción de energía en la industria automotriz.

Conclusiones

Se desarrolló un estudio numérico para evaluar el efecto de la sección transversal en las capacidades de absorción de energía de estructuras tipo sándwich con base cuadrada. A partir de tal análisis se concluye:

1. La efectividad del modelo discreto para representar la deformación plástica de perfiles estructurales. Se calcularon diferencias menores a 5% para E_a y P_{max} . Ver sección validación.
2. De acuerdo con la Tabla 2 y considerando que los arreglos tienen la misma masa (0.350 kg), las capacidades de absorción de energía se encuentran en función de la sección transversal más que del número de costillas y espesor.
3. Contrario a lo esperado la incorporación de costillas no significa un mejor desempeño de las estructuras tipo sándwich. Esto se corrobora con el perfil S-02 (refuerzos en diagonal) quien obtuvo una disminución del 17.14% de E_a respecto al perfil con base cuadrada simple (S-00).
4. Estructuras con refuerzo en diagonal (S-02) o en forma romboidal (S-03) no son recomendables para absorción de energía dado que presentan una menor resistencia para la formación de pliegues plásticos, así como poca estabilidad de la carga de aplastamiento promedio (P_m).
5. Respecto a la absorción de energía el empleo de costillas en forma de cruz permitió un aumento de E_a en un 16.75% al ser comparados con un perfil sin refuerzo (S-00).

6. El mejor comportamiento de CFE se obtuvo al reforzar una base cuadrada con costillas en forma de cruz. Tal valor significó un aumento del 6.75% respecto al valor calculado de CFE para el perfil S-00. Por tanto, tal estructura tipo sándwich debe ser considerada como una solución efectiva y de bajo costo para el control de cargas dinámicas de impacto.

Referencias

- [1] (INEGI), I. N. (2016). "Accidentes de tránsito terrestre en zonas urbanas y suburbanas". Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.
- [2] Charles M. Farmer, Elisa R. Braveri, Eric L. Mitter. "Two-vehicle side impact crashes: The Relationship of vehicle and crash characteristics to Injury Severity". Pergamon, 1996. 29, 399-406.
- [3] CALLISTER, W. D., RETHWISCH, D. G. (2009). "Materials Science and Engineering: An Introduction" 8th Edition - William D. Callister, David G. Rethwisch - Google Livros (8va ed.).
- [4] Yuen, S. C. K., & Nurick, G. N. (2008). "The Energy-Absorbing Characteristics of Tubular Structures with Geometric and Material Modifications: An Overview" Applied Mechanics Reviews, 61(2), 020802.
- [5] Ingrole, A., Hao, A., & Liang, R. (2017). "Design and modeling of auxetic and hybrid honeycomb structures for in-plane property enhancement" Materials & Design, 117, 72–83. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.12.067>
- [6] Laurin, F., & Vizzini, A. J. (2005). "Energy absorption of sandwich panels with composite-reinforced foam core" Journal of Sandwich Structures & Materials, 7(2), 113–132
- [7] R. K. McFarland, (1963), "Hexagonal Cell Structures Under Post-Buckling Axial Load", AIAA J., vol. 1, (6).
- [8] T. Wierzbicki, (1983) "Crushing analysis of metal honeycombs", International Journal of Impact Engineering., vol. 1 (2).
- [9] A. B. Jacob y O. N. Arunkumar, (2016) "Improving the Crashworthiness of An Automobile Bumper", Journal. Mechanical. Civil. Engineering.
- [10] J. Paz, J. Díaz, L. Romera, y M. Costas, (2015) "Size and shape optimization of aluminum tubes with GFRP honeycomb reinforcements for crashworthy aircraft structures", vol. 133.
- [11] J. F. Davalos, P. Qiao, X. F. Xu, J. Robinson, y K. E. Barth, (2001) "Modeling and characterization of ® ber-reinforced plastic honeycomb sandwich panels for highway bridge applications", Composite structures, vol. 52,
- [12] G. D. Caserta, L. Iannucci, y U. Galvanetto, (2011) "Shock absorption performance of a motorbike helmet with honeycomb reinforced liner", Composite Structures., vol. 93(11).
- [13] S. T. Hong, J. Pan, T. Tyan, y P. Prasad, (2006) "Quasi-static crush behavior of aluminum honeycomb specimens under non-proportional compression-dominant combined loads", International Journal of Plasticity., vol. 22 (6).
- [14] Quirino Estrada, Dariusz Szwedowicz, Alejandro Rodriguez-Mendez, Oscar A. Gómez-Vargas, Milton Elias-Espinosa, Jesús Silva-Aceves, (2018) "Energy absorption performance of concentric and multi-cell profiles involving damage evolution criteria.". Thin-Walled Structures, vol. 124, 218-134.